

Madrid, 04 de noviembre de 2015

Por la presente, me es grato comunicarle que el artículo de Ref.: **IC-14-146**, titulado **“TEMPERATURA DE COLOR CORRELACIONADA DE LA LUZ NATURAL: ANÁLISIS DINÁMICO EN ESPACIOS INTERIORES”**, cuyos autores son: Monteoliva, J.M.; Villalba, A.; Pattini, A., y recibido el día 13/11/2014, ha sido aceptado por el Consejo de Redacción el pasado día 27/10/2015 para su publicación en la Revista **INFORMES DE LA CONSTRUCCIÓN**. Está previsto que dicho artículo sea publicado en el próximo número **540** de la revista (\*)

La revista Informes de la Construcción, con ISSN 0020-08883, está dedicada a temas relacionados con la construcción y se publica trimestralmente en el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc), centro perteneciente al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Desde el año 1971 hasta la actualidad, pueden consultarse todos los números publicados en la página web:

<http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es>

Actualmente, todas las revistas científicas del CSIC se distribuyen en formato on-line, por lo que podrá consultar su artículo en la mencionada página una vez que se publique el número al que se ha asignado.

De forma provisional, su comunicación ha recibido el número DOI (Digital Object Identifier): <http://dx.doi.org/10.3989/ic.14.146> Dicho identificador no pasará a estar activo hasta el momento de la publicación.

Nuestra revista está incluida en diferentes bases de datos científico-técnicas de prestigio como Scopus y Thomson-Reuters, entre otros. Está indizada y sus resúmenes se publican en los siguientes índices:

- Science Citation Index Ampliado (SciSearch)
- Journal Citation Reports/Edición científica
- Avery Index to Architectural Periodicals
- Iconda
- Scopus
- Latindex

En enero de 2012 fue certificada como EXCELENTE en la Convocatoria de Calidad de las Revistas Científicas Españolas de la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología – FECYT y renovada, dicha certificación, en el presente año.

Le expreso mi más sincera enhorabuena por la publicación de su artículo, agradeciéndole que haya elegido nuestra revista, y espero poder contar con su colaboración en futuros números.

Atentamente,



David Revuelta Crespo  
Director de la Revista

(\*) La Dirección de Informes de la Construcción se reserva la posibilidad de cambiar el número final de publicación por motivos estrictamente editoriales, en cuyo caso será oportunamente informado

# Temperatura de color correlacionada de la luz natural: análisis dinámico en espacios interiores

## *Correlated color temperature of daylight: dynamic analysis in sunlit indoors*

J. M. Monteoliva (\*), A. Villalba (\*), A. Pattini (\*)

### RESUMEN

Actualmente los estudios de la iluminación natural focalizan en la amabilidad visual del espacio. Esta nueva tendencia surge de la necesidad de profesionales e investigadores de definir indicadores de la calidad de la iluminación natural. Uno de ellos es la temperatura de color correlacionada (TCC). En este trabajo, se propone analizar la influencia de la orientación de las ventanas y sus sistemas de sombreado en la percepción de color del ambiente (TCC). Para ello se propone una metodología de caracterización dinámica (espacial y temporal) de la TCC de la fuente luz natural. El análisis se desarrolló en un modelo a escala de un espacio interior, bajo condiciones de cielo claro. Los resultados han evidenciado la importancia de la orientación de la ventana en la TCC de un espacio, obteniendo variaciones de hasta el 50 %. De manera complementaria, se detecta la capacidad de modificar la TCC de los ambientes interiores que poseen las superficies vidriadas y los dispositivos de control solar.

**Palabras clave:** Luz natural; temperatura de color correlacionada; dispositivos de sombreado; espacios interiores.

### ABSTRACT

Currently daylight studies are focused on visual amenity. This new trend arises from the need of professionals and researchers to define indicators of daylight quality. One such indicator is the correlated color temperature (CCT). In this paper, the influence of windows orientation and shading systems in color perception of the environment (CCT) is discussed. To achieve this goal a dynamic (spatial and temporal) characterization methodology of daylight source CCT is proposed. The analysis was performed on a scale model of an indoor space, under clear sky conditions. Results showed the importance of the window orientation in the indoor CCT of daylight, obtaining variations of up to 50 %. It is also noted that shading device cause changes in indoor configurations and sensations. Also here the impact of shading systems and glass on the TCC of natural light entering a space was analyzed.

**Keywords:** Daylight; correlated color temperature; shading device; indoors spaces.

(\*) Instituto de Ciencias Humanas, Sociales y Ambientales, CCT Mendoza - CONICET, Mendoza (Argentina).

Persona de contacto/Corresponding author: [jmonteoliva@mendoza-conicet.gob.ar](mailto:jmonteoliva@mendoza-conicet.gob.ar) (J. M. Monteoliva)

---

**Cómo citar este artículo/Citation:** Suárez, F. (2015). Temperatura de color correlacionada de la luz natural: análisis dinámico en espacios interiores. *Informes de la Construcción*, 67(540): e123, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.14.146>.

**Licencia / License:** Salvo indicación contraria, todos los contenidos de la edición electrónica de *Informes de la Construcción* se distribuyen bajo una licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento no Comercial 3.0. España (cc-by-nc).

## 1. INTRODUCCIÓN

Comprender la relación entre la iluminación y el espacio puede ayudar a los proyectistas a mejorar el diseño de los locales interiores y el desempeño de sus usuarios (1). El conocimiento de los efectos de la luz sobre el ser humano se ha basado tradicionalmente en la investigación de la usabilidad visual –niveles de iluminancia, reducción de deslumbramiento, uniformidad en la distribución de la luz– (2). Sin embargo, actualmente los estudios de la iluminación natural son focalizados en la amabilidad visual del espacio (3). Este concepto involucra parámetros vinculados con la apariencia, la visión al exterior, la privacidad y el color. Esta nueva tendencia surge de la necesidad de profesionales e investigadores de definir indicadores de la «calidad de la iluminación natural». Por esta misma razón, organismos internacionales como la División de Iluminación Interior de la CIE, ha creado comités dedicados a estas temáticas, tales como el Comité Técnico dirigido a proponer descriptores de calidad de iluminación (*Technical Committee aimed at proposing Lighting Quality Descriptors*) (5). Asimismo, podemos destacar los aportes producidos por el Comité Europeo de Normalización (Norma UNE EN 12464/1:2012) y el Consejo de la Construcción Verde de Estados Unidos (Normas de certificación LEED - EQ:2013), entre otros. Estos estudios ponen de manifiesto que cada tipología de espacio interior presenta distintas necesidades de diseño e instalaciones lumínicas (6). Asimismo, éstas deberán responder a la variabilidad de la fuente de luz natural a través de estudios dinámicos de iluminación natural (5) (7) (8).

La «temperatura de color (TC)» junto a la «iluminancia» son las principales variables que determinan el comportamiento lumínico de los sistemas de iluminación artificial complementaria a la luz natural en los espacios interiores (9). La TC de una fuente de luz, también denominada «temperatura de color correlacionada (TCC)», es definida a partir de comparar su color, dentro del espectro luminoso, con el de la luz que emitiría un cuerpo negro calentado a una temperatura determinada. Por este motivo la TC se expresa en grados Kelvin [°K], a pesar de no reflejar expresamente una medida de temperatura. La TC es una forma simplificada de describir las propiedades espectrales de una fuente de luz. Dado que es un solo valor, la TC, ha liderado la industria de la iluminación como indicador para informar la apariencia del color de la luz emitida por las fuentes artificiales. Convencionalmente, de acuerdo a la escala de TC, son denominadas «cálidas» aquellas fuentes que presentan una calificación por debajo de los 3300 °K (apariencia amarillenta) y «frías» aquellas que presentan una TC por encima de los 5300 °K (apariencia blanco azulado) (UNE EN 12464/1, 2003). Los valores de TC de la mayoría de las fuentes artificiales disponibles en el mercado, por lo general, oscilan de los 2.700 °K a 6.500 °K<sup>1</sup> (10). Respecto de la luz natural, su composición espectral varía considerablemente, alcanzando valores de entre 3.800 °K y 40.000 °K (11). Estas importantes variaciones se deben a diferentes parámetros como: distintos tipos de cielos, horas del día, ángulos de incidencia

de la radiación, arquitectura del espacio, vegetación, suelo, superficie exterior, tamaño de ventanas y posición, característica del material traslúcido de las ventanas y tratamiento superficial del mismo, entre otros.

La TCC es un factor esencial en los espacios interiores, debido a que modifica la percepción humana (12) (13). Ésta, empleada adecuadamente fomenta y mejora el impacto de la iluminación en los usuarios (14). Es decir, que una adecuada aplicación de la TCC en un espacio puede ser beneficiosa para sus ocupantes. En el caso de un uso inadecuado, ésta presenta efectos negativos sobre la salud humana, tanto a nivel ocular, emocional como a nivel del sistema circadiano (15) (16) (17) (18), aspectos que repercuten en el desempeño de los usuarios.

La luz en un espacio puede ser considerada en tres dimensiones: cantidad, espectro y distribución (19). La iluminación natural tiene la particularidad de tener un elevado «índice de reproducción del color (IRC)» lo cual favorece (sin distorsionar) la percepción del color de los objetos. Éste índice mide la capacidad que tiene una fuente luminosa para reproducir fielmente los colores de varios objetos en comparación con una fuente de luz natural o ideal. Los valores oscilan entre 0 (IRC del 0 %, lámpara de sodio de baja presión) y 100 (IRC del 100 %, luz natural).

Sin embargo, cuando la luz solar ingresa al interior de un espacio a través de una ventana, su composición espectral se ve afectada (20) (21). La luz natural que ingresa a un espacio está influenciada por diversos factores, como ya fue mencionado anteriormente. Esta modificación espectral se observa especialmente en situaciones donde las ventanas poseen superficies vidriadas con tratamientos de color y/o con el uso de dispositivos de control solar. Estos cambios usualmente no generan influencias significativas en el rendimiento visual del sujeto en tareas acromáticas o visualmente sencillas. Sin embargo, en aquellas tareas de discriminación de color con elevada precisión o cercanas al umbral visual, el espectro proporcionado por la luz es determinante (22).

En este contexto resulta pertinente preguntarse: ¿Puede la TCC de la luz natural describirse de manera homóloga a la iluminación artificial?, ¿la TCC de un espacio interior es igual para diferentes orientaciones?, ¿cada orientación presenta la misma variación de TCC a largo de una jornada?, ¿cuánto modifican los «dispositivos de control solar (DCS)» la TCC de un espacio? De acuerdo a esta problemática, este trabajo sostiene como hipótesis la importancia de caracterizar la TCC de la luz natural a través de estudios dinámicos que responda a las variaciones propias de la fuente de radiación solar (sol) y a las modificaciones provocadas por el entorno físico (DCS y orientaciones de las aberturas). A partir de ello, este estudio propone como objetivo caracterizar las modificaciones provocadas a la TC de la luz natural producto de la dinámica de la fuente y de los componentes edilicios –ventanas– que debe atravesar antes de ingresar en un espacio interior bajo condiciones de cielo claro.

<sup>1</sup> Cabe destacar que diferentes fuentes artificiales de similar o igual temperatura de color correlacionada (TCC), pueden variar considerablemente en la calidad de la luz emitida. Por este motivo, la forma más útil para determinar esta calidad está en el denominado índice de reproducción cromática (IRC).

## 2. CASO DE ESTUDIO

Como caso de estudio se seleccionó un espacio de aprendizaje (aula) típico de la región (Mendoza, Argentina). La mayoría de los niños juegan, aprenden, transitan e interactúan gran parte de su jornada diaria en estos edificios educativos. La relevancia de la iluminación natural de estos espacios radica, no sólo en la importancia de tener un ambiente visual apropiado para la realización de tareas, sino también a nivel de salud –sistema circadiano– y confort visual. Además, la adecuada implementación de la iluminación natural, en las aulas, permite alcanzar ahorros de energía por la disminución de los consumos de electricidad por iluminación artificial.

En ciudades donde predomina el cielo claro con sol, como el caso de Mendoza (Argentina) ( $32^{\circ} 53' 00''$  Sur,  $68^{\circ} 49' 00''$  Oeste), como en una importante cantidad de localidades en el mundo, con un promedio anual de duración de sol de 2850 horas; la radiación solar es lo suficientemente «energética» en términos de eficacia luminosa<sup>2</sup>. Esto promueve la cantidad y calidad adecuada de la luz natural en los espacios interiores para realizar tareas visuales diurnas en confort, con un ahorro energético de varias horas al día (23), equivalente al 50-80 % del consumo energético requerido por la iluminación artificial (24). Aspectos importantes, sobre todo, en periodos de crisis energética como la que vive actualmente la región y el mundo.

## 3. METODOLOGÍA

A continuación se describe la metodología empleada en este trabajo con el objetivo de conocer las variaciones en la temperatura de color correlacionada (TCC) de la fuente de iluminación natural en el interior de un espacio bajo condiciones de cielo claro.

*Diseño experimental.* A partir de un modelo a escala (25) (26) se realizan mediciones instantáneas de la TCC proporcionada por la luz natural bajo dos variables independientes: tres condición de aventanamiento: (a) condición de «ventanas abiertas VA», (b) condición de «ventanas cerradas VC» y (c) condición de «ventanas cerradas con dispositivo de control solar VC+DCS», en tres orientaciones diferentes (N, S y E).

*Modelo a escala.* El espacio representado en el modelo a escala (1:20) corresponde a un aula típica del parque edificio regional de acuerdo a las especificaciones de la normativa argentina vigente IRAM AADL J20 04. Las principales características son: (i) superficie cubierta  $40 \text{ m}^2$  ( $5 \times 8 \text{ m}$ ); (ii) altura  $2,6 \text{ m}$ ; (iii) superficie vidriada unilateral  $10 \text{ m}^2 = 1,5 \times 6,5 \text{ m}$  (véase la Figura 1).

*Cálculo de la temperatura de color correlacionada (TCC).* El registro de los datos fue tomado sobre una superficie mate ubicada en la pared adyacente a la ventana. La superficie de medición empleada para los registros de TCC corresponde a la carta estándar Kodak blanca de reflectancia 90 % (*Munsell 90 % Reflectance (White) Neutral Patch*), cuidando de que no incidiera radiación solar directa sobre la misma. Las coordenadas cromáticas (x, y, Y) fueron obtenidas a través de un Colorímetro KONICA-MINOLTA CS100. Posteriormente para la obtención de la TCC fue aplicado el algoritmo validado de McCamy [1] (27). Las mediciones fueron registradas durante el periodo invernal (21 y 22 de julio) en horas de la mañana y posteriores al mediodía (8:30 a 15:00). El criterio de selección de la jornada de estudio, está fundamentado en la simetría conocida de la fuente natural a partir del mediodía solar<sup>3</sup>.

$$TCC [^{\circ}\text{K}] = a.n^3 + b.n^2 - c.n + d \quad [1]$$

donde:

(xe) = 0,332, (ye) = 0,1858, (a) = -449, (b) = 3525, (c) = 6823,3, (d) = 5520,33 son valores constantes y (n) = (x-xe) / (y-ye).

*Selección de la superficie vidriada y el dispositivo de control solar (DCS).*

*Superficie Vidriada.* El material seleccionado forma parte de las condiciones de aventanamiento (b) y (c), condición de ventana cerrada (VC) y condición de ventana cerrada con dispositivo de control solar (VC+DCS), respectivamente. A continuación se presenta la Tabla 1 con las principales características ópticas del material.

*Dispositivos de control solar (DCS).* En las ventanas de las envolventes edilicias, particularmente con acceso a luz solar

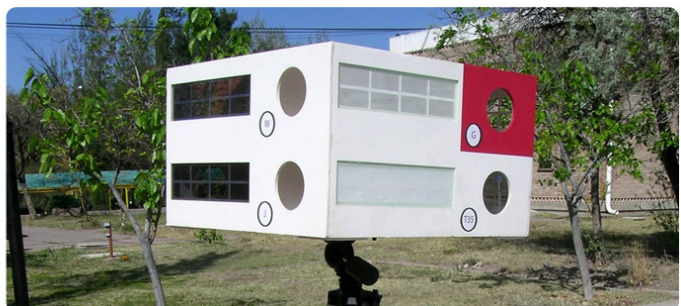
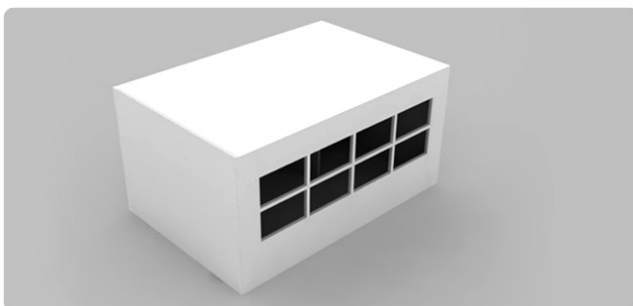


Figura 1 Modelo a escala (1:20) de un espacio educativo tipo del parque edificio regional.

<sup>2</sup> La eficacia luminosa se define como el cociente entre iluminancia e irradiancia y se expresa en lúmenes por vatio (lm/W). Su valor depende de la altitud del sol, de la nubosidad y de la concentración de aerosoles y vapor de agua en la atmósfera.

<sup>3</sup> Resulta pertinente aclarar que los registros fueron recopilados de acuerdo a la hora estándar, es por esto que las orientaciones este-oeste se presentan como simétricas con el eje a las 13:30 h (correspondiente al medio día solar en la región). Esto se debe a que en la ubicación geográfica de  $-32.890278^{\circ}$ ,  $-68.847222^{\circ}$  presenta un desfase de una hora treinta minutos entre la hora estándar y la hora solar.



directa, es habitual la presencia de DCS que regulan el ingreso de la radiación solar visible al interior de los espacios. Para este trabajo se seleccionó como DCS de estudio la cortina textil interior. El dispositivo seleccionado forma parte, de manera conjunta con la superficie vidriada, de la condición de aventanamiento (c), condición de ventana cerrada con dispositivo de control solar (VC+DCS). Esta selección se justifica por su frecuente uso en edificios no residenciales y escolares de la región (28). Las cortinas textiles interiores son sistemas de control solar de transmitancia homogénea, que presentan una transmitancia uniformemente disminuida y corresponden a la categoría de membranas flexibles (29). Las cortinas textiles interiores presentan una amplia variedad de características distintivas (patrón de tramado, color y densidad), las cuales estarán relacionadas a su uso y aplicación arquitectónica (30). Para este trabajo en particular, fue seleccionado el textil: «tropical (gabardina de poliéster)» que corresponden a la categoría de tejido plano con construcción de ligamen-



to tafetán de color claro (31) (véase la Tabla 2). Asimismo, éste forma parte de los denominados «tejidos cerrados» (0 % a 7 % de apertura) de hilados de color intermedio con una reflectancia del 42 % y un índice de «transmitancia visible (TV)» de 0,24 (32).

#### 4. RESULTADOS



##### (a) Condición de ventanas abiertas (VA)

Al analizar los valores generales obtenidos, podemos observar que la TCC más baja registrada bajo esta condición, corresponde a la orientación (E) a las 8:30 h (4643 °K); mientras que el valor más elevado fue de 14205 °K, en la orientación (S) a las 11:00 h (véase la Tabla 3 y Figura 2). Posteriormente, al profundizar el estudio por orientación, se observa que la orientación (N) es la que presenta la mayor constancia en sus

**Tabla 1.** Caracterización de la superficie vidriada

Superficie Vidriada		Vista del Material	
			
<b>Vidrio</b>	Genérico	<b>Espesor</b>	3 mm
<b>Marca</b>	Pilkington North America	<b>Transmitancia solar</b>	0,834
<b>Transmitancia visible</b>	0,89	<b>Reflectancia solar</b>	0,075
<b>Reflectancia visible</b>	0,082	<b>Emisividad</b>	0,84

**Tabla 2.** Caracterización del dispositivo de control solar (DCS)

Características del Dispositivo de Control Solar		Vista del Material	
			
<b>Textil</b>	Tropical beige (Tropical Claro)	<b>Albedo</b>	45 %
<b>Color</b>	beige	<b>Densidad</b>	26 × 23
<b>Composición</b>	100 % poliéster	<b>Peso</b>	100 - 150 g/m <sup>2</sup>
<b>Factor de apertura</b>	7 %	<b>Características</b>	Tela lisa, fuerte y compacta
<b>Conductividad</b>	0,17 W/m <sup>2</sup> K	<b>Principales usos</b>	Decoración, indumentaria
<b>Espesor</b>	0,5 mm		
<b>Transmitancia solar (TS)</b>	20 %	<b>Transmitancia visible (TV)</b>	24 %

**Tabla 3.** Resultados de las TCC obtenidos para las orientaciones (N), (S) y (E) en el modelo bajo condición de ventana abierta durante la jornada (8:30 a 13:00 h)

	Norte (VA)									
	x	y	xe	ye	x-xe	y-ye	n=(x-xe)/(y-ye)	N3	N2	TCC [°K]
8:30	0,328	0,398	0,332	0,186	0,00	0,21	-0,02	0,000	0,000	5650
9:00	0,326	0,405			-0,01	0,22	-0,03	0,000	0,001	5710
10:00	0,317	0,403			-0,02	0,22	-0,07	0,000	0,005	6009
11:00	0,313	0,401			-0,02	0,22	-0,09	-0,001	0,008	6151
12:00	0,308	0,399			-0,02	0,21	-0,11	-0,001	0,013	6334
13:00	0,301	0,395			-0,03	0,21	-0,15	-0,003	0,022	6610
	Sur (VA)									
	x	y	xe	ye	x-xe	y-ye	n=(x-xe)/(y-ye)	N3	N2	TCC [°K]
8:30	0,251	0,348	0,332	0,186	-0,08	0,16	-0,50	-0,125	0,249	9863
9:00	0,25	0,342			-0,08	0,16	-0,52	-0,145	0,276	10139
10:00	0,231	0,311			-0,10	0,13	-0,81	-0,525	0,651	13554
11:00	0,231	0,304			-0,10	0,12	-0,85	-0,624	0,730	14205
12:00	0,238	0,312			-0,09	0,13	-0,74	-0,413	0,555	12744
13:00	0,243	0,317			-0,09	0,13	-0,68	-0,312	0,460	11911
	Este (VA)									
	x	y	xe	ye	x-xe	y-ye	n=(x-xe)/(y-ye)	N3	N2	TCC [°K]
8:30	0,372	0,475	0,332	0,186	0,04	0,29	0,14	0,003	0,019	4643
9:00	0,33	0,445			0,00	0,26	-0,01	0,000	0,000	5573
10:00	0,293	0,402			-0,04	0,22	-0,18	-0,006	0,033	6869
11:00	0,289	0,387			-0,04	0,20	-0,21	-0,010	0,046	7144
12:00	0,262	0,348			-0,07	0,16	-0,43	-0,080	0,186	9158
13:00	0,24	0,318			-0,09	0,13	-0,70	-0,337	0,484	12127



Figura 2. Análisis dinámico de la TCC y su desplazamiento dentro del cuadro de color CIE 1931 para las orientaciones (N), (S) y (E) bajo condiciones de ventana abierta (VA) durante la jornada (8:30 a 13:00 h).

valores a lo largo de la jornada, oscilando entre los 5650 °K y 6609 °K (DS = 368) con una diferencia máxima de 1000 °K. Por otra parte, la orientación (S) presenta un rango de valores que oscilan entre los 9863 °K y 14205 °K (DS = 1780) con una diferencia máxima de 4000 °K. Finalmente, de las orientaciones estudiadas, la orientación (E), es la que presenta mayor oscilación en la TCC. Sus variaciones a lo largo de la jornada oscilan entre los 4643 °K y los 12127 °K (DS = 2702), obteniendo una diferencia máxima entre sus valores de aproximadamente 7500 °K.

A continuación se grafica los valores de TCC obtenidos en el espacio de color CIE 1931<sup>4</sup>, donde se representa la variación de la TCC de la fuente de luz natural en las distintas orientaciones analizadas (N, S y E) (véase la Figura 3).

### (b) Condición de ventanas cerradas (VC)

A continuación se presentan los resultados obtenidos en la TCC de la fuente natural bajo la condición de ventanas cerradas (VC). A diferencia de la primera condición –ventana abierta (VA)–, este análisis fue focalizado en las orientaciones (N) y (S) extendiendo la jornada de estudio de 9:00 a 15:00 h con intervalo de 2 h entre las tomas (véase la Tabla 4).

Al analizar la orientación (N), y tomando como referencia la  $TCC_{prom}$  de la condición ventanas abiertas (VA), se observa para la condición de ventana cerrada (VC) un aumento del 8 %. Sus valores oscilan entre los 6393 °K y 6882 °K (DS = 224,9) con una diferencia máxima entre ellos menor a 500 °K. Por otra parte, en la orientación (S), tomando nueva-

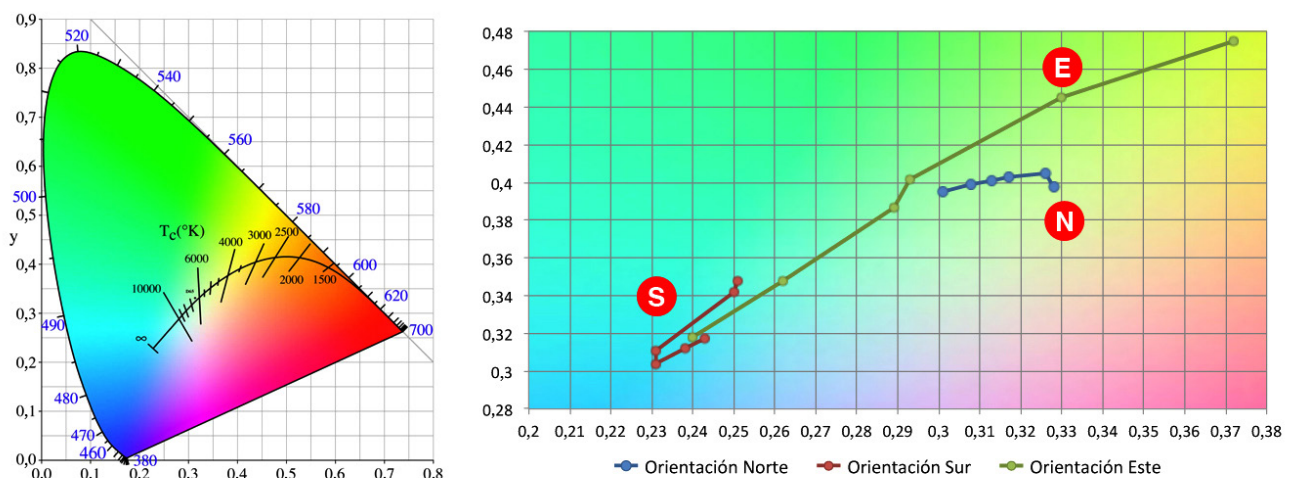


Figura 3. Análisis dinámico de la TCC y su desplazamiento dentro del cuadro de color CIE 1931 para las orientaciones (N), (S) y (E) bajo condiciones de ventana abierta (VA) durante la jornada (8:30 a 13:00 h).

**Tabla 4.** Resultados de las TCC obtenidos para las orientaciones (N) y (S) en el modelo bajo condición de ventana cerrada (es decir, con superficie vidriada) durante la jornada (9:00 a 15:00 h)

	Norte (VC)									
	x	y	xe	ye	x-xe	y-ye	n=(x-xe)/(y-ye)	N3	N2	TCC [°K]
9:00	0,306	0,402	0,332	0,186	-0,03	0,22	-0,12	-0,002	0,014	6393
11:00	0,313	0,396			-0,04	0,20	-0,18	-0,006	0,033	6882
13:00	0,307	0,386			-0,03	0,20	-0,12	-0,002	0,016	6428
15:00	0,303	0,401			-0,03	0,22	-0,13	-0,002	0,018	6505
	Sur (VC)									
	x	y	xe	ye	x-xe	y-ye	n=(x-xe)/(y-ye)	N3	N2	TCC [°K]
9:00	0,295	0,389	0,332	0,186	-0,04	0,20	-0,18	-0,006	0,033	6882
11:00	0,261	0,339			-0,07	0,15	-0,46	-0,100	0,215	9484
13:00	0,258	0,333			-0,07	0,15	-0,50	-0,127	0,253	9898
15:00	0,258	0,337			-0,07	0,15	-0,49	-0,117	0,240	9757

<sup>4</sup> CIE 1931, corresponde a uno de los primeros espacios de color definidos matemáticamente. Fue establecido en 1931, por la *Commission Internationale de l'Éclairage* (CIE), basándose en una serie de experimentos realizados a finales de los años 1920 por W. David Wright y John Guild.



mente como referencia la condición VA, se observa una considerable disminución en las  $TCC_{prom}$  registradas (25 %). Estos valores oscilan entre los 9005 °K y 12069 °K (DS = 1425,9) con una diferencia máxima >3000 °K. Finalmente, las diferencias en las  $TCC_{prom}$  registradas bajo la condición VC entre ambas orientaciones (N y S) es de 2453 °K, superior al 25 %.

### (c) Condición de ventanas cerradas con dispositivo de control solar (VC+DCS)

Seguidamente, se presentan las TCC obtenidas en el modelo bajo condición VC+DCS para las orientaciones (N) y (S) (véase la Tabla 5).

Al analizar la orientación (N), se observa que la condición de ventana cerrada con dispositivo de control solar (VC+DCS) presenta una disminución del 20 % en las  $TCC_{prom}$ , respecto de la condición ventanas cerrada (VC). En términos generales los valores de TCC oscilan entre los 4854 °K y 5407 °K (DS = 234,6) con una diferencia máxima entre ellos de aproximadamente 600 °K. De manera particular, en la orientación (S), tomando nuevamente como referencia la condición VC, se observa una disminución del >35 % en las  $TCC_{prom}$  registradas. Los valores en esta orientación oscilan entre los 5293 °K y 5778 °K (DS = 259) con una diferencia máxima de <500 °K. Finalmente, las diferencias en las  $TCC_{prom}$  registradas bajo la condición VC+DCS entre la orientación (N) y (S) es de 383 °K, siendo ésta <7 %. Como se puede observar, esta condición (VC+DCS), presenta la menor diferencia entre las orientaciones y condiciones analizadas.

## 5. DISCUSIÓN

Como resultado de este estudio, se confirmó que la TCC de la luz natural que ingresa a un espacio interior no es constante a lo largo de la jornada. Asimismo se demostró que la orientación de la ventana es un factor determinante en la TCC de un espacio iluminado por luz natural. Si bien se registró, en orientaciones norte y sur, una constancia en los valores obtenidos a lo largo de la jornada, esta se da en diferentes rangos (°K), de acuerdo a la orientación de la abertura. Bajo la condición de ventanas abiertas (VA), la orientación norte durante la jornada presenta una  $TCC_{prom} = 6000^{\circ}\text{K}$ , la cual

es duplicada por la orientación sur ( $TCC_{prom} = 12000^{\circ}\text{K}$ ); presentando considerables diferencias entre sí ( $\Delta TCC_{norte/sur} = 6000^{\circ}\text{K}$ ).

Por otra parte, al incorporar elementos a la ventana (vidrio y cortina textil de tropical) se observa, como se suponía a priori, que estos provocan variaciones en la TCC de la luz natural que ingresa al espacio interior. Siendo máxima la variación en la TCC para la condición VC+DCS. Las variaciones generadas por los sistemas de sombreado son en la orientación (N) de 1300 °K (13:00 h) y en la (S) de 8400 °K (11:00 h). Estos resultados ponen en evidencia el potencial que poseen los dispositivos de control solar (DCS) en la configuración de los ambientes interiores y sus sensaciones derivadas de la percepción del color de la luz ambiental.

Respecto de los interrogantes planteados al comienzo de este trabajo, podemos afirmar que la TCC de la iluminación natural requiere un análisis dinámico que se corresponda con la dinámica de la fuente –sol–, esto exige el desarrollo de metodologías particulares que respondan adecuadamente a esta característica. Como sabemos, la mayoría de las fuentes artificiales ofrecen parámetros constantes durante su uso (nivel, dirección, TCC, entre otros). Es decir, que si se evalúa estos parámetros en diferentes horarios y momentos, los resultados serán siempre similares. Sin embargo, con la fuente natural no ocurre lo mismo. A partir de ello, se propone un cambio de paradigma en la metodología de análisis de la TCC de la luz natural. De esta manera se sugiere dejar de lado el paradigma estático o constante heredado de las características de la fuente artificial que reduce las variaciones de la luz natural a un valor instantáneo, y adoptar un nuevo paradigma dinámico.

## 6. CONCLUSIONES

La literatura tradicional en arquitectura e ingeniería, como las normas nacionales e internacionales siempre han estado focalizadas en el indicador de «iluminancia horizontal», como principal parámetro de evaluación de la condición de iluminación (33). Sin embargo, actualmente los entes normativos internacionales están haciendo un esfuerzo por incorporar nuevos indicadores de la calidad de la iluminación

**Tabla 5.** Resultados de las TCC obtenidos para las orientaciones (N) y (S) en el modelo bajo condición de ventana cerrada con dispositivo de control (es decir, con superficie vidriada y cortinas interiores textiles) durante la jornada (9:00 a 15:00 h)

	Norte (VC+DCS)									
	x	y	xe	ye	x-xe	y-ye	n=(x-xe)/(y-ye)	N3	N2	TCC [ °K]
9:00	0,356	0,395	0,332	0,186	0,02	0,21	0,11	0,002	0,013	4854
11:00	0,342	0,358			0,01	0,17	0,06	0,000	0,003	5407
13:00	0,335	0,401			0,00	0,22	0,01	0,000	0,000	5265
15:00	0,356	0,371			0,02	0,19	0,13	0,002	0,017	5163
	Sur (VC+DCS)									
	x	y	xe	ye	x-xe	y-ye	n=(x-xe)/(y-ye)	N3	N2	TCC [ °K]
9:00	0,342	0,421	0,332	0,186	0,01	0,24	0,04	0,000	0,002	5293
11:00	0,328	0,39			0,00	0,20	-0,02	0,000	0,000	5778
13:00	0,362	0,399			0,03	0,21	0,14	0,003	0,020	5373
15:00	0,336	0,408			0,00	0,41	0,01	0,000	0,000	5778



en el interior de un espacio como la TCC. Este desafío debe contar con el compromiso de la ciencia y los organismos de investigación (34) (35) (36), como así también de los proyectistas de espacios interiores iluminados con luz natural, los cuales deberán atender a estos aspectos para alcanzar espacios de óptima calidad de iluminación. La importancia del estudio de la temperatura de color correlacionada (TCC) proporcionada por la luz natural radica en sus efectos significativos sobre la salud humana, tales como tensión ocular, efectos en las emociones y en el sistema circadiano humano (15) (16) (17) (18), aspectos que generan una pérdida adicional del desempeño.

La metodología dinámica propuesta en este trabajo, busca iniciar una serie de estudios que permitan profundizar en el análisis del comportamiento de la TCC de la luz natural en espacios interiores. De esta manera, dejaremos de pensar en espacios iluminados por luz natural como «espacios lumínicamente estáticos o constantes» y empezaremos a analizar «espacios lumínicamente dinámicos». Así se articula el análisis dinámico de la TCC proporcionada por la fuente na-

tural, al paradigma de las «métricas dinámicas» (37). Como resultado de la problemática planteada surgen nuevos interrogantes ¿la TCC de la fuente natural preserva los rangos actualmente empleados para la fuente artificial?, ¿los valores de TCC y sus variaciones, a lo largo de la jornada, son similares bajo diferentes características de cielo, como por ejemplo un cielo cubierto? Para responder a estas preguntas, es necesario continuar con nuevos estudios regionales que permitan un mayor acercamiento a la caracterización dinámica de la TCC proporcionada por la fuente natural.

Actualmente, se encuentra en ejecución nuevos estudios con el objetivo de generar nuevas escala y rangos de TCC específicos para la fuente natural. Estos nuevos estudios deberán ser complementados con estudios subjetivos de percepción y preferencia de los usuarios, de acuerdo a las distintas actividades que se realizan en un espacio. De esta manera, integrando aspectos objetivo + aspectos subjetivo, se alcanzan los tres aspectos fundamentales en un acondicionamiento lumínico en espacios de aprendizaje: eficiencia, confort y desempeño modulados por un adecuado diseño.

## REFERENCIAS

- (1) Oneworkpalce. (1999). Seeing the difference, the importance of quality lighting in the workplace. *Workplace Issues*.
- (2) Knez, I. (2001). Effects of colour of light on nonvisual psychological processes. *Journal of Environmental Psychology*, 21(2): 201-208, doi: <http://dx.doi.org/10.1006/jevp.2000.0198>.
- (3) Ruck N, Aschehoug O, Aydinli S, Christoffersen J, Courret G, Edmonds I, Jakobiak R, Kischkoweit-Lopin M, Klinger M, Lee E, Michel L, Scartezzini JL, Selkowitz S. (2000). *Daylight in buildings. A source book on daylighting systems and components*. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory-International Energy Agency, Solar Heating and Cooling Programme, SHC, Energy Conservation in buildings and Community Systems Programme.
- (4) Veitch, J.A. (1997). Revisiting the performance and mood effects of information about lighting and fluorescent lamp type. *Journal of Environmental Psychology*, 17(3): 253-262, doi: <http://dx.doi.org/10.1006/jevp.1997.0059>.
- (5) Fontoynt, M. (2002). Perceived Performance of Daylighting Systems: Lighting Efficacy and Agreeableness. *Solar Energy*. 73(2): 83-94, doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X\(02\)00035-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X(02)00035-X).
- (6) Samani, S. A. (2011). The Impact of Indoor on Student's Learning Performance in Learning Environments: A knowledge internalization perspective. *International Journal of Business and Social Science*, 3(24): 127-136. [http://ijbssnet.com/journals/Vol\\_3\\_No\\_24\\_Special\\_Issue\\_December\\_2012/14.pdf](http://ijbssnet.com/journals/Vol_3_No_24_Special_Issue_December_2012/14.pdf).
- (7) Monteoliva, J.M., Villalba, A, Pattini, A (2014). Uso de dispositivo de control solar en aulas: impacto en la simulación dinámica de la iluminación natural. *Ambiente Construido*, 14(3): 43-58.
- (8) Monteoliva, J.M., Villalba, A., Pattini, A. (2013). Uso de bases climáticas regionales y su impacto en la simulación de la iluminación natural de alta precisión. *Revista de Energías Renovables y Medio Ambiente (ERMA)*, 31: 37-44.
- (9) Mott, M., Robinson, D., Walden, A., Burnette, J., Rutherford, A. (2012). Illuminating the Effects of Dynamic Lighting on Student Learning. *SAGE Open*, (april-june): 1-9, doi: <http://dx.doi.org/10.1177/2158244012445585>.
- (10) Lighting Research Center - Rensselaer Polytechnic Institute. (2013). <http://www.lrc.rpi.edu/education/learning/terminology/cct.asp>.
- (11) Löfberg, H.A. (1976). *Dagsljus utomhus, grundläggande samband och tillämpning sexempel*. Swedish: Bygghörsknin-gens informationsblad B 9.
- (12) Veitch, J.A., Newsham, G.R. (1998). Lighting quality and energy-efficiency effects on task performance, mood, health, satisfaction and comfort. *Journal of Indo-European Studies*, 27(1): 107-129, doi: <http://dx.doi.org/10.1080/00994480.1998.10748216>.
- (13) Barkmann, C., Wessolowski, N., Schulte-Markwort, M. (2011). Applicability and efficacy of variable light in schools. *Physiology and Behavior*, 150(3): 621-627, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.physbeh.2011.09.020>.
- (14) Sanaz, A. S. (2011). The Influence of Light on Student's Learning Performance in Learning Environments: A Knowledge Internalization Perspective. *Journal of World Academy of Science, Engineering and Technology*, 81.
- (15) Knez, I. (1997, 19-21 November). Changes in females and males' positive and negative moods as a result of variations in CCT, CRI and illuminance levels. En *Proceedings of Right Light: 4th European Conference on Energy Efficient Lighting*, vol. 1, 149-154. Copenhagen, Denmark.
- (16) Van Bommel, W.J.M., van den Beld, G.J. (2004). Lighting for work: a review of visual and biological effects. *Lighting Research & Technology*, 36(4): 255-269, doi: <http://dx.doi.org/10.1191/1365782804li1220a>.
- (17) Mills, P. R., Tomkins, S. C., Schlangen, L. J. (2007). The effect of high correlated colour temperature office lighting on employee wellbeing and work performance. *Journal of Circadian Rhythms*, 5(1): 2, doi: <http://dx.doi.org/10.1186/1740-3391-5-2>.

- (18) Halonen, L., Tetri, E., Bhusal, P. (2010). Chapter 3: Lighting Quality. En *Guidebook on energy efficient electric lighting for buildings*, (pp. 41-56). Finland: Aalto University School of Science and Technology.
- (19) Boyce, P., Hunter, C., Howlett, O. (2003). *The Benefits of Daylight through Windows*. New York: Lighting Research Center-Rensselaer Polytechnic Institute.
- (20) Köster, H. (2004). *Dynamic Daylighting Architecture: Basics, Systems, Projects*. Basel: Birkhäuser.
- (21) Baker N.V, Franchiotti A., Steemers K.A. (1993). *Daylighting in Architecture: A European Reference Book*. UK: James and James (Science Publishers) Ltd.
- (22) Thorn. Brighter Pupils. The application of lighting in Education. (2010). [http://www.thornlighting.com/holding/microsites/education\\_microsite\\_uk/lightineducation.html](http://www.thornlighting.com/holding/microsites/education_microsite_uk/lightineducation.html).
- (23) Pattini, A. (2009). *La Luz Natural en las Escuelas: aprovechamiento y control de la luz solar en aulas*. Buenos Aires: Dunken.
- (24) Bodart, M., De Herde, A. (2002). Global Energy Savings in Office Buildings By Use of Daylighting. *Energy and Buildings*, 34(5): 421-429, doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00117-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00117-7).
- (25) Dubois, M., Cantin, F., Johnsen, K. (2007 September) The effect of coated glazing on visual perception: A pilot study using scale models. *Lighting Research & Technologies*, 39(3): 283-304. doi: <http://dx.doi.org/10.1177/1477153507080074>.
- (26) Pineault, N., Dubois, M.-C. (2008). Effects of window glazing type on daylight quality: Scale model study of a living room under natural sky, Leukos. *The journal of the Illuminating Engineering Society of North America*, 5(2): 83-89. doi: <http://dx.doi.org/10.1582/LEUKOS.2008.05.02.001>.
- (27) Hernandez-Andres, J., Lee, R. L., Romero, J. (1999). Calculating correlated color temperatures across the entire gamut of daylight and skylight chromaticities. *Applied optics*, 38(27): 5703-5709, doi: <http://dx.doi.org/10.1364/AO.38.005703>.
- (28) Villalba, A., Pattini, A. (2012). Análisis morfológico de componentes de paso y elementos de control de luz solar en envolvente edilicia no residencial en climas soleados. El caso de la ciudad de Mendoza. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (ERMA)*, 14(1): 65-72.
- (29) Baker, N., Steemers, K. (2002). *Daylight Design of Buildings*. London: James & James.
- (30) Jonsson, J.C., Lee, E.S., Rubin, M. (2008). Light scattering properties of woven shade-screen material used for daylighting and solar heat-gain control. En *Proceedings of: SPIE Optics + Photonics*. San Diego, CA.
- (31) Keyes, M.W. (1967). Analysis and rating of drapery materials used for indoor shading. *ASHRAE Transactions*, 73(1):8.4.1.
- (32) Villalba, A., Pattini, A., Córca, L. (2012). Análisis de las características morfológicas de las envolventes edilicias y del entorno urbano desde la perspectiva de la iluminación natural. *Ambiente Construido*, 12(4): 159-175.
- (33) Boyce, P.R. (2004). Lighting research for interiors: The beginning of the end or the end of the beginning. *Lighting Research & Technology*, 36(4): 283-294, doi: <http://dx.doi.org/10.1191/11477153504li1180a>.
- (34) Piccoli, B., Soci, G., Zambelli, P.L., Pisaniello, D. (2004). Photometry in the Workplace: The rationale for a new method. *The Annals of Occupational Hygiene*, 48(1): 29-38, doi: <http://dx.doi.org/10.1093/annhyg/meg076>.
- (35) Navvab, Monjtaba (2006) A Comparison of Traditional and high Colour Temperature Lighting on the Near Acuity of Elementary School Children. *Lighting Research & Technologies*, 38(1): 41-52, doi: <http://dx.doi.org/10.1191/1365782806li1550a>.
- (36) Goodman, T.M. (2009). Measurement and specification of lighting: A look at the future. *Lighting Research & Technology*, 41(3): 229-243, doi: <http://dx.doi.org/10.1177/1477153509338881>.
- (37) Mardaljevic, J., Heschong, L., Lee, E. (2009). Daylight metrics and energy savings. *Lighting Research and Technology*, 41(3): 261-283, doi: <http://dx.doi.org/10.1177/1477153509339703>.

\* \* \*